



**HAL**  
open science

## Sulla scia di Icaro

Alessandro Bottaro, Julien Favier, Joel Guerrero, Divya Venkataraman,  
Hakan Wedin

► **To cite this version:**

Alessandro Bottaro, Julien Favier, Joel Guerrero, Divya Venkataraman, Hakan Wedin. Sulla scia di Icaro. Sapere, Edizioni Dedalo, pp.66-77, 2009, 9788822093981. hal-01073987

**HAL Id: hal-01073987**

**<https://hal.science/hal-01073987>**

Submitted on 11 Oct 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Sulla scia di Icaro

A. Bottaro, J. Favier, J. Guerrero, D. Venkataraman, H. Wedin

**U**n giorno del 1948 l'ingegnere svizzero George de Mestral stava ripulendo il suo cane da piccole peline (frutti di bardana) che erano rimaste aggrappate al pelo. Osservandole meglio si accorse che avevano piccoli uncini elastici che, una volta messi a contatto con un tessuto, si aggrappavano alle maglie. Lo spirito di osservazione di de Mestral lo portò a ideare il velcro e a un successo commerciale straordinario. Questo è un esempio di tecnologia biomimetica, cioè quella tecnologia ispirata dall'osservazione di soluzioni testate e raffinate in natura in un processo di ottimizzazione che dura da tre o quattro miliardi di anni. La biomimetica oggi permette di concepire soluzioni tecnologiche nuove, efficaci e di facile impiego. Gli esempi di successo commerciale non sono ancora numerosissimi: mentre da un lato forse non siamo stati ancora capaci di osservare bene – o semplicemente capire – la fisica sottesa a certi processi naturali, dall'altro la comunità scientifica al lavoro su tecnologie bioispirate cresce a vista d'occhio, e nuovi brevetti "bionici" sono all'ordine del giorno. L'attività in biomimetica condotta presso il Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni, Ambiente e Territorio (DICAT) dell'Università di Genova attiene a varie specialità della meccanica dei continui, cioè di quei mezzi, fluidi e solidi, che si possono rappresentare e studiare senza ricorrere a una descrizione microscopica. In questa relazione ci concentreremo su un aspetto del lavoro relativo al moto di mezzi fluidi, e parleremo quindi di *biofluidodinamica*. La fluidodinamica studia il movimento di un sistema fluido sotto

l'azione di forze e momenti esercitati sul sistema stesso, e le interazioni del sistema con l'ambiente circostante; moltissimi sono i fluidi in movimento attorno e dentro di noi e i processi tecnologici e biologici che si affidano alla circolazione di un fluido per il loro funzionamento sono numerosissimi. Esempi vanno dal flusso del sangue nel sistema circolatorio, al movimento dell'aria nel sistema respiratorio, alla formazione di valanghe, allo scorrere della lava, al moto di fluidi dentro pompe e compressori oppure attorno a velivoli aerei, terrestri o marini.

Il progetto FLUBIO si occupa di ricerca su problemi di fluidodinamica ambientale e biologica. Lo studio di problemi di base, senza interesse pratico immediato, è reso possibile da un generoso finanziamento dell'Unione Europea tramite un progetto Marie Curie "Early Stage Training", che ha fatto approdare al DICAT giovani ricercatori di molte nazionalità. Tra le tematiche affrontate nell'ambito del progetto FLUBIO c'è quella relativa alla ricerca di sistemi propulsivi bio-ispirati, eventualmente accoppiati a tecniche innovative di controllo e manipolazione del flusso, capaci, per esempio, di influire sulla resistenza al moto di un corpo che si sposta in un fluido, o sulla portanza di un oggetto in volo. Gli studi descritti nel seguito sono solo parte delle attività condotte nell'ambito di FLUBIO; si tratta di ricerche numeriche, basate cioè su soluzioni approssimate al calcolatore delle equazioni del movimento di un fluido. La simulazione numerica permette di ottenere risultati rapidi e accurati tramite "esperimenti" in gallerie del vento o canali idrodinamici *virtuali*.

La progettazione di velivoli dal minimo attrito tiene impegnati i ricercatori del DICAT di Genova che lavorano al progetto europeo FLUBIO.

La realizzazione del "perfetto automa volante" trae ispirazione dalla natura e in particolare dal volo dell'airone, un ottimo modello per velivoli con ali ricoperte da piume che battono al vento



### La galleria del vento virtuale

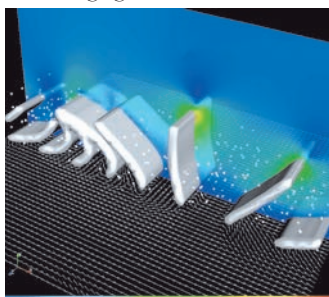
Il modo classico di studiare fenomeni fluidodinamici consiste nell'effettuare esperimenti su modelli in gallerie del vento o in canali idrodinamici, per poi trasferire il risultato a eventuali prototipi tramite principi di similitudine. È chiaro però che questa tecnica è lunga e costosa, soprattutto quando lo spazio dei parametri del problema trattato è molto grande. Negli ultimi trent'anni si è sviluppata e affinata una tecnica alternativa che consiste nella risoluzione numerica delle equazioni della meccanica dei fluidi. Tali equazioni discendono dalla meccanica classica ed esprimono criteri di conservazione di quantità quali la massa, l'energia, la quantità di moto o il momento angolare. Prendono la forma di equazioni differenziali alle derivate parziali: soluzioni esatte esistono solo in pochi casi particolari (e in regime di moto laminare, cioè con filetti fluidi che procedono secondo andamenti *regolari*) e nella stragrande maggioranza dei casi, informazioni sul campo di moto e sulle forze aero/idro-dinamiche possono essere ottenute soltanto tramite approssimazioni semi-analitiche o computazionali. Per risolvere al computer un'equazione differenziale siamo costretti a discretizzarla, cioè a rimpiazzare il valore (continuo) del

campo con valori discreti: si genera quindi una griglia di calcolo che ricopre tutto il dominio fluido. A ogni punto di questa griglia viene assegnato un valore delle variabili fisiche, che viene messo in relazione con i valori dei punti di griglia confinanti impiegando le equazioni stesse. Esistono oggi svariate tecniche – dalle cosiddette differenze finite ai metodi spettrali – che permettono di trasformare le equazioni differenziali in equazioni algebriche; il punto chiave è che, con l'infittirsi della griglia, la soluzione discreta deve tendere verso la soluzione del continuo fluido.

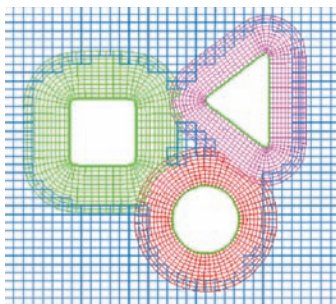
Al DICAT le equazioni della fluidodinamica vengono risolte – sia nel caso di campi di moto comprimibili che incomprimibili – principalmente con tecniche alle differenze finite e ai volumi finiti. Tali metodi semplici ed efficaci sono accoppiati a procedure più elaborate indispensabili per rappresentare con facilità la presenza di più corpi solidi, all'interno del dominio fluido, in moto relativo l'uno rispetto all'altro. Tra queste procedure risultano particolarmente efficaci quella detta dei *contorni immersi*, impiegata per esempio da Dauptain, Favier e Bottaro [1] per lo studio della propulsione, tramite il battito sincrono di un insieme di ciglia unite tra loro a formare delle specie di palette, della medusa *Pleurobrachia Pileus*, e quella detta *Chimera*, usata da

*Dall'osservazione delle ali degli uccelli nascono i dispositivi per gli aeroplani. Le alette di estremità (winglets) sono, per esempio, costruite sul modello delle penne remiganti primarie.*

*Fig. 1. Un'istantanea della simulazione del modello delle ciglia della medusa Pleurobrachia Pileus, effettuata con la tecnica dei contorni immersi. I puntini bianchi rappresentano uno scalare passivo (un tracciante senza massa) che viene messo in movimento dal battito delle ciglia. La figura in basso esemplifica il concetto della tecnica Chimera: ci sono tre corpi – di geometria semplice in questo esempio – con griglie di calcolo solidali con ciascun corpo, che si muovono sullo sfondo di un dominio raffigurato da una griglia blu.*



Velocità (m/s) 0.0 0.018 0.035 0.053 0.070



Guerrero [2] per lo studio della propulsione di piccoli veicoli aerei tramite ali batenti. La tecnica dei contorni immersi permette di inserire corpi mobili e/o deformabili all'interno di un dominio di calcolo, per il quale si può realizzare una semplice griglia di fondo a base cartesiana, tramite l'imposizione di una forza volumetrica artificiale nelle equazioni. La tecnica Chimera prevede invece la realizzazione di diverse griglie mobili e/o deformabili nel tempo, solidali con i differenti corpi in moto. I dati di campo, velocità, pressione, ecc., devono poi essere interpolati da una griglia all'altra. Esempi di applicazione delle due tecniche sono forniti in figura 1.

## L'aereo che batte le ali

Biologi, zoologi e bio-ingegneri concordano sul fatto che la natura si basa su un movimento di "va e vieni" per trasporto e propulsione sulla terra, in aria e nei mari: le gambe o le zampe per camminare, le ali per volare, le pinne per nuotare. Tra questi modi di trasporto, quello basato sul battito di ali è uno dei più diffusi: è impiegato da oltre un milione di specie differenti di insetti e, delle 13.000 specie di vertebrati a sangue caldo (uccelli e mammiferi), circa 10.000 tipi di uccelli e pipistrelli battono le ali per generare propulsione e portanza. Non c'è dubbio: a madre Natura il volo piace. D'altro canto, malgrado la mitologia, l'uomo è incapace di produrre una potenza sufficiente per volare autonomamente, anche se fosse dotato di ali ottimizzate allo scopo: la potenza richiesta per battere le ali durante il volo è dell'ordine di 200 W per ogni chilogrammo di massa muscolare, mentre l'uomo può produrre solo una potenza di circa 10 W al chilo [3].

La tecnologia aeronautica ha fatto progressi straordinari in questi ultimi 100 anni, mantenendo (quasi) sempre inalterato il paradigma dell'ala fissa, ma è difficile competere con la natura che ha il vantaggio di un'evoluzione lunga milioni di anni. Un piccione può facilmente raggiungere velocità dell'ordine degli 80 km/h, il che significa che può coprire 75 volte la lunghezza del suo corpo in un secondo; in un secondo, uno storno può percorrere 120 volte la lunghezza del proprio corpo, mentre la mosca domestica arriva a 430. Il *Concorde* in volo di crociera a Mach 2 (due volte la velocità del suono) copre circa 10

lunghezze del corpo al secondo. Il rollio (rotazione attorno all'asse longitudinale) di un aeroplano per manovre acrobatiche come l'MXS monoposto può permettere rotazioni di 420 gradi in un secondo, mentre la rondine comune può eccedere i 5.000 gradi al secondo. L'accelerazione massima (in termini di G, accelerazione di gravità) consentita ad aerei per trasporto civile varia da 4 a 5 G; i migliori aerei militari sopportano circa 10 G e alcuni aerei acrobatici arrivano fino a 14, che è lo stesso valore sperimentato comunemente dagli uccelli. Ogni volta che osserviamo un uccello posarsi con precisione sul ramo di un albero, dovremmo riflettere sul fatto che quel minuscolo essere ha capacità e prestazioni superiori alle migliori macchine volanti concepite e costruite dall'uomo.

Dal punto di vista cinematico, il battito delle ali è un fenomeno complicato, con parti diverse dell'ala che si muovono a velocità diverse; l'ala (o la pinna) è un oggetto molto flessibile e l'angolo di attacco locale, cioè l'angolo tra la corda e la direzione del moto, dove per corda si intende quel segmento rettilineo che unisce i bordi d'attacco e di uscita dell'ala – misurato in diverse posizioni lungo l'asse normale al profilo alare – varia in continuazione a ogni battito. Lo sviluppo di tecniche sperimentali e numeriche avanzate permette oggi a ingegneri, fisici e zoologi di studiare in dettaglio il moto di uccelli, pipistrelli, insetti, pesci e cetacei, esempi illuminanti di aerodinamica non stazionaria finalizzata alla generazione di spinta e portanza; gli studi hanno condotto al progetto di piccoli veicoli senza pilota, sia in acqua che in aria, che mimano le caratteristiche principali di animali che volano o nuotano. Questi velivoli prendono il nome di *Micro-Air-Vehicles* (MAVs), *Nano-Air-Vehicles* (NAVs) o *Autonomous-Underwater-Vehicles* (AUVs). Sono generalmente impiegati per missioni di sorveglianza e riconoscimento, per effettuare misure remote in condizioni pericolose, per il controllo del traffico, il monitoraggio di incendi, l'ispezione di linee elettriche o cavi sottomarini, fotografie aeree, ecc. I MAV, NAV e UAV si trovano in condizioni simili a quelle della loro controparte biologica, con numeri di Reynolds (1),  $Re$ , variabili da  $10^3$  a  $10^5$ ; se l'ala (o la pinna) è fissa, a questi valori di  $Re$  si sperimentano condizioni fluidodinamiche avverse, con perdita di portanza e/o aumento

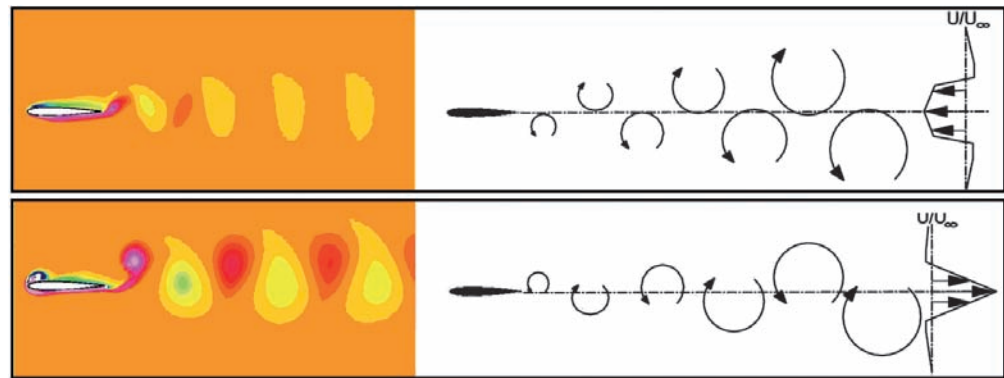


Fig. 2. Formazione di vortici dietro a un profilo in moto a velocità  $U_\infty$  con produzione di resistenza. La parte a colori rappresenta il campo di vorticità, proporzionale alla velocità angolare di rotazione delle particelle fluide attorno ad assi centrati su ogni particella ed ortogonali al piano del moto. In basso, formazione di vortici dietro a un profilo che si muove orizzontalmente e oscilla verticalmente senza variare l'angolo di attacco rispetto all'asse orizzontale. In questo secondo caso si ha produzione di spinta, associata a una distribuzione di velocità (mediata nel tempo) raffigurata qualitativamente nella parte di destra.

della resistenza, legati alla formazione di un flusso che si distacca dal corpo. Questi numeri di Reynolds sono anche sufficientemente bassi perché si formi vicino alla superficie del profilo alare uno strato limite di spessore piuttosto grande (lo strato limite è una regione del flusso con vorticità non nulla, che si forma vicino alle pareti per effetto della diffusione molecolare del fluido), quindi con bassi valori del rapporto portanza su resistenza. L'ala battente, oltre a garantire il superamento delle difficoltà di cui sopra, permette un'ottima manovrabilità del mezzo, anche a basse velocità, con alta efficienza.

### Generare spinta con un'ala battente

Un corpo immerso in un fluido è soggetto a forze; per il loro calcolo si può procedere sommando (infatti integrando) le forze superficiali infinitesime che operano tutto attorno al corpo. Queste forze infinitesime sono dovute alla pressione e agli sforzi viscosi (che a loro volta vanno ascritti al fatto che ogni fluido è caratterizzato da un certo valore della viscosità). Tralasciando di considerare per il momento la direzione ortogonale al piano del profilo alare, il vettore forza risultante può essere scomposto in due componenti: se il moto del profilo è lungo l'asse orizzontale (asse x nel seguito) ci sarà una forza di resistenza – che si oppone al moto – oppure una spinta – che favorisce il moto – lungo x, in funzione del tipo di scia, come vedremo tra un attimo. Ci sarà poi una componente con direzione verticale (una portanza nel caso dell'ala di un aereo, o una forza verso il basso se si considerano gli alettoni delle macchine da corsa). Per comprendere come si genera la spinta è istruttivo osservare come cambia la scia pro-

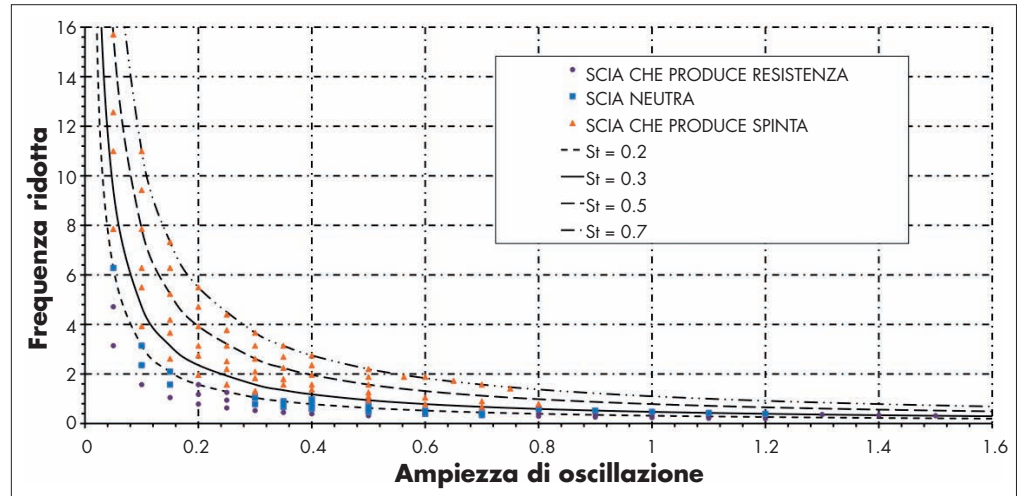
dotta da un'ala che batte mentre si sposta orizzontalmente nell'aria, rispetto al caso della cosiddetta ala fissa (con l'ala cioè che si muove solo orizzontalmente, senza battere). Il fluido dietro un corpo tozzo, o dietro un profilo alare, in moto a velocità orizzontale  $U_\infty$ , a bassi valori del numero di Reynolds, forma la cosiddetta scia di von Karman, raffigurata in figura 2 (immagine superiore, l'ala si sposta da destra verso sinistra). Dal punto di vista qualitativo tale scia consta di una serie superiore di vortici che ruotano in senso orario, ed una serie inferiore – sfasata in x – con senso di rotazione antiorario. Mediando la distribuzione di velocità nel tempo si ottiene un profilo come quello indicato nella figura di destra (immagine superiore), con una velocità negativa in una regione di scia non piccola, e quindi un deficit di quantità di moto che viene bilanciato dalla resistenza aerodinamica dell'ala. Se ora cominciamo a far oscillare il profilo, semplicemente muovendolo verso l'alto e verso il basso periodicamente, senza variare l'angolo di attacco dell'ala, e se la frequenza di oscillazione è scelta in modo accorto, la schiera di vortici che si forma assomiglia a quella illustrata in figura 2 (immagine inferiore), con una velocità media con la forma di un getto. Questo profilo medio genera una spinta (una forza orizzontale con verso uguale alla velocità dell'ala  $U_\infty$ ) e la scia di vortici in questo caso è nota come scia inversa di von Karman.

### Come pesci e uccelli

Un aspetto importante del volo che sfrutta le ali battenti, o del nuoto tramite pinne che oscillano, è la capacità di generare spinta mantenendo un'efficienza propulsiva  $\eta$  (definita dal rapporto tra la potenza

# biomimetica

Fig. 3. Classificazione delle scie; le isolinee del numero di Strouhal sono tracciate per mostrare come la tipologia dipenda da  $St$ . In questa figura la frequenza ridotta  $f$  è definita da  $f = \pi n c / U_\infty$  (con  $c$  la lunghezza della corda del profilo alare); tale parametro è proporzionale al rapporto tra il tempo impiegato da una particella trasportata a velocità  $U_\infty$  ad oltrepassare il profilo, diviso il periodo del battito dell'ala.



aerodinamica prodotta e la potenza meccanica in ingresso) relativamente alta. I primi tentativi di costruire sistemi propulsivi ispirati al volo o al nuoto hanno prodotto risultati deludenti in termini di efficienza propulsiva. Solo una comprensione approfondita dei meccanismi di creazione della vorticità nella scia ha permesso, in tempi recenti, di fare progressi significativi. È stato scoperto che animali volanti e acquatici si muovono con frequenze corrispondenti a regimi di formazione e distacco di vortici che coincidono con il massimo dell'efficienza propulsiva. La frequenza è generalmente rappresentata da un numero adimensionale, il numero di Strouhal, definito come  $St = n A / U_\infty$  (con  $n$  la frequenza di battito in Hertz,  $A$  l'ampiezza – differenza tra il punto più alto e il più basso dell'ala durante il battito – e  $U_\infty$  la velocità di avanzamento del profilo alare). Si è osservato che pinne e ali in natura oscillano con valori del numero di Strouhal compresi tra 0,2 e 0,4. In questo

intervallo l'efficienza propulsiva può arrivare anche al 70% (quando l'ala batte in modo naturale, non quando semplicemente oscilla verticalmente, caso per il quale l'efficienza è molto minore). Allo scopo di definire la dipendenza dei regimi di moto dal numero di Strouhal, abbiamo simulato sul computer vari regimi di oscillazione, per un profilo alare fissato, classificando la scia come produttrice di resistenza, neutra, o produttrice di spinta. I risultati sono riassunti nella figura 3: per  $St$  inferiore a circa 0,2 la scia di solito genera resistenza. Per valori compresi tra 0,2 e 0,25 viene spesso prodotta una scia neutra, mentre arriviamo a produrre sistematicamente spinta quando  $St$  eccede il valore di 0,3. Questi risultati numerici si accordano bene con osservazioni sperimentali, e confermano la forte dipendenza del tipo di scia da  $St$ .

Viene poi spontaneo chiedersi come varia l'efficienza propulsiva quando  $St$  aumenta. Una risposta è fornita dalla figura 4, dove

Fig. 4. Variazione della spinta e dell'efficienza propulsiva in funzione del numero di Strouhal,  $St$ , per due valori della frequenza ridotta  $f$ .

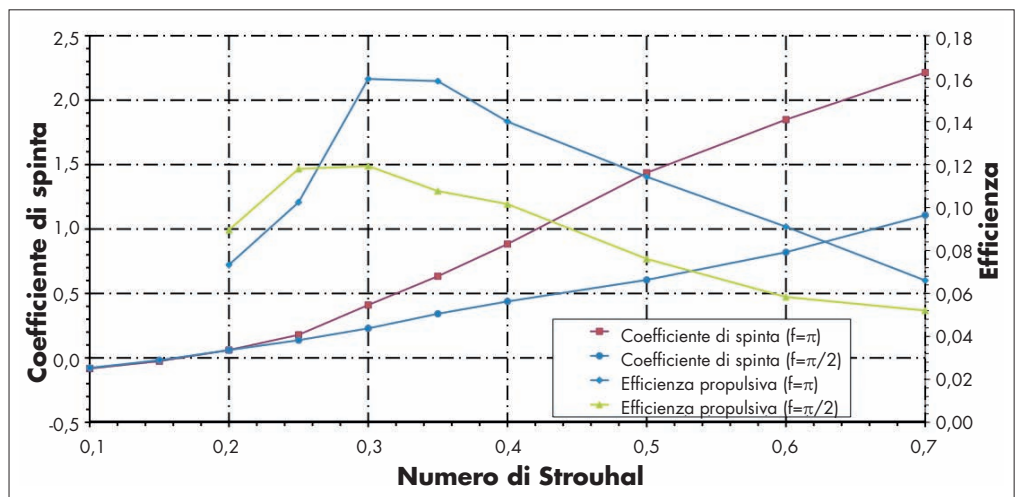
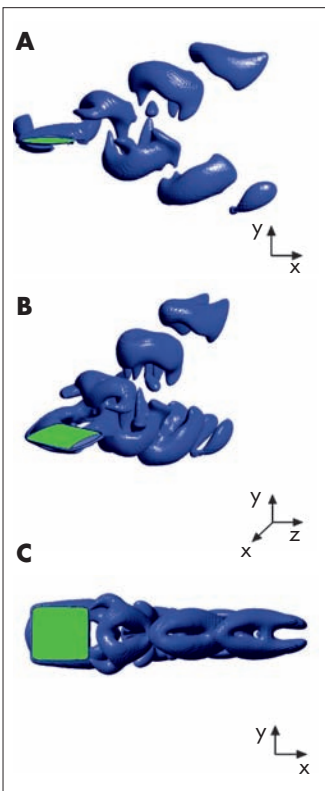


Fig. 5. Topologia delle strutture vorticosi rilasciate da un'ala durante un'oscillazione verticale (lungo l'asse  $y$ ), senza variazione dell'angolo di attacco. I parametri sono:  $St = 0,5$ , l'ampiezza  $A$  del battito è pari alla metà della corda  $c$ , il numero di Reynolds  $Re = U c / \nu$  vale 500 (con  $\nu$  la viscosità cinematica del fluido); questa configurazione produce spinta. a) Vista laterale, b) vista in prospettiva, c) vista dall'alto. Le strutture blu possono essere immaginate come se fossero prodotte da un colorante passivo (del fumo ad esempio) rilasciato dalla superficie dell'ala nell'aria qualche istante prima di fissare le immagini. L'ala è disegnata in verde



sono riportati valori di  $\eta$  per  $St$  che varia tra 0,1 a 0,7, per due valori diversi della frequenza ridotta di battito,  $f$ . Come in figura 3, sono chiaramente identificabili tre regimi distinti: uno corrisponde a produzione di resistenza (che si ha quando il coefficiente di spinta è negativo) per  $St < 0,18$ ; una regione intermedia per  $St$  in un intorno di 0,2 corrisponde ad una piccola zona di transizione in cui spinta e resistenza sono prossime allo zero. Quando  $St$  è maggiore di 0,22 (circa) abbiamo generazione di spinta. Il valore di  $\eta$  aumenta rapidamente fino a  $St \approx 0,3$ , per poi diminuire. Risultati sperimentali e numerici coincidono su questo punto: i migliori regimi operativi si ottengono quando  $St$  è compreso tra 0,2 e 0,4; il coefficiente di spinta migliora quando  $St$  aumenta, ma al costo di un'efficienza propulsiva degradata. È chiaro tuttavia che possono esistere situazioni per le quali un uccello deve produrre rapide accelerazioni – per esempio per sfuggire ad un predatore. In queste situazioni è utile poter disporre di un'alta frequenza di battito, anche se solo temporaneamente; salvare le penne val bene un forte dispendio energetico!

Questi primi risultati mostrano chiaramente l'interesse di approfondire le relazioni esistenti tra le forze prodotte, le prestazioni aerodinamiche e i parametri di battito; solo un'analisi attenta dei meccanismi propulsivi di insetti, pesci e uccelli può aiutarci a progettare veicoli che volino o nuotino in modo efficiente.

### Effetti tridimensionali

Finora ci siamo limitati a descrivere i risultati di simulazioni fluidodinamiche bidimensionali (abbiamo cioè trascurato la dimensione normale al piano del profilo alare). Sappiamo però che le ali hanno una data "profondità", e che le scie formano spesso anelli vorticosi che devono essere rappresentati in uno spazio a tre dimensioni. Le analisi numeriche di moti fluidi tridimensionali che variano nel tempo rappresentano un ostacolo per molti computer (il problema è generalmente legato alla memoria, non alla rapidità dei processori) visto il gran numero di parametri in gioco e la necessità di rappresentare accuratamente il campo di moto tramite milioni di variabili discrete. Abbiamo avuto la fortuna di poter utilizzare in modo intensivo i com-

puter del centro di supercalcolo di Stoccarda in Germania, e alcuni dei risultati ottenuti sono rappresentati qui di seguito. La figura 5 mostra per esempio un'immagine istantanea della scia prodotta da un'ala battente per una determinata combinazione di parametri: è chiaro che l'effetto della profondità finita influenza in modo significativo la topologia della scia: l'ala oscillante produce due insiemi di anelli di vorticità interconnessi tra loro, e trasportati a valle. La scia di figura – che produce spinta – non ha alcuna somiglianza con le scie dei calcoli bidimensionali!

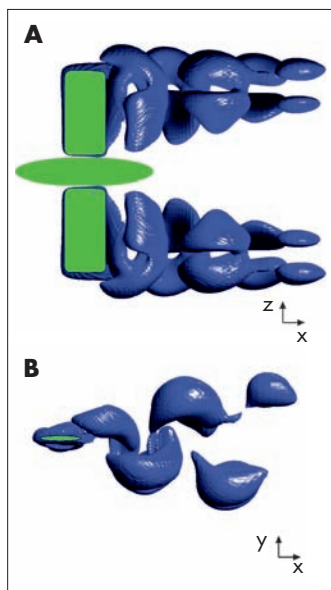
Quale è quindi la pertinenza, o la validità, dei risultati bidimensionali? I nostri calcoli mostrano che simulazioni in due dimensioni sovrastimano le forze aerodinamiche; tuttavia l'approssimazione diventa tanto più accettabile quanto più l'ala è profonda, per una data lunghezza della corda, e si trovano regimi di scia simili nei casi bi- e tri-dimensionali, per gli stessi valori del numero di Strouhal. Per gli uccelli e gli insetti, che hanno le ali relativamente lunghe, i risultati in due dimensioni possono – malgrado tutto – fornire informazioni interessanti.

Fino a questo punto le nostre ali sono state dotate di un semplice movimento oscillatorio verticale. È chiaro che, in realtà, le ali degli uccelli sono articolate attorno ad una "fusoliera", e che il battito è un fenomeno complesso. Dal punto di vista qualitativo il battito può essere immaginato come la composizione di un moto oscillatorio e di uno in cui si varia l'angolo di attacco. Nella figura 6 è mostrata un'istantanea del movimento del fluido prodotto dal battito di due ali impennate sul corpo; rispetto al caso precedente la struttura vorticosi della scia di ciascuna ala mostra una dissimmetria rispetto all'asse centrale dell'ala stessa, come ci si sarebbe dovuto aspettare, mentre la topologia della scia è qualitativamente invariata. Come per il caso precedente, ci sono diversi regimi di moto in funzione dei parametri del sistema e la mappatura preliminare dei vari regimi è in fase di realizzazione.

### Tirando le somme

Gli esperimenti numerici descritti in questo breve resoconto concordano con risultati sperimentali ottenuti da biologi, zoologi e fluidodinamici e dimostrano che uc-

Fig. 6. Struttura della scia per il caso di due ali battenti imperniate sul corpo (raffigurato a forma di ellisse nell'immagine in alto), durante la fase di movimento verso il basso. I parametri sono:  $St = 0,25$ ,  $f = 1$ ,  $Re = 500$ . Questa configurazione produce spinta. A) Vista dall'alto. B) Vista laterale.



celli e pesci si muovono con valori del numero di Strouhal tali da ottimizzare l'efficienza propulsiva. Malgrado il fatto che scie bidimensionali ("virtuali") e tridimensionali differiscano non poco, si osservano regimi di moto simili nei due casi, e questo può servire come giustificazione parziale per adottare l'ipotesi semplificatrice di moto in due dimensioni (almeno durante il primo lavoro di sgrossamento dei dati). L'attività che stiamo conducendo al momento è volta alla modellazione di ali tridimensionali flessibili, in cui il solido (l'ala) e il fluido (l'aria) interagiscono tra loro, per meglio catturare la fisica del volo. Chiaramente, l'evoluzione naturale dei meccanismi di volo a battito costituisce una sfida formidabile per il progettista: la ricerca dell'automa volante perfetto va avanti.

### Ali con le piume

I primi modelli di veicoli aerei ad ali battenti si devono a Leonardo, che si ispirò al volo del pipistrello. La scelta di questo mammifero dalle ali prive di penne come modello per una "macchina volante" è legata alla straordinaria agilità del pipistrello, e forse in parte anche alla difficoltà di afferrare e riprodurre appieno il ruolo di penne e piume. Oggi si sa che le penne svolgono un ruolo cruciale per il controllo del volo di un uccello, e gli permettono, ad esempio, un atterraggio di precisione su un'antenna televisiva senza alcuna difficoltà. Ma forse non si sa ancora tutto sui ruoli possibili di penne e piume; tra l'altro è interessante in questo contesto ricordare come recenti ritrovamenti di fossili nelle rocce cretache della provincia cinese del Liaoning abbiano messo in evidenza la presenza di lunghe strutture integumentarie filamentose in alcune specie di dinosauri; alcuni hanno interpretato tali protopenne come l'indicazione della capacità di volo di certi dinosauri.

L'attività descritta nel seguito è motivata da osservazioni sul comportamento di una certa classe di piume sul dorso delle ali di alcuni uccelli. Un'immagine che illustra il fenomeno considerato è riportata in figura 7, dove si può osservare un airone intento a pescare, mentre si libra nell'aria a poca distanza dalla superficie dell'acqua. Alcune piume, le cosiddette "copritrici", sono sollevate e oscillano al vento, assistendo l'uc-

cello nella sua ricerca di portanza (2).

Le stesse piume sono sollevate dalla superficie dell'ala e vibrano anche in situazioni di volo planato, o quando il vento è forte o instabile. Quello che pensiamo è che tali piume copritrici non abbiano semplicemente un ruolo di isolamento termico e protezione dall'acqua – come comunemente riportato – ma che agiscano anche come azionatori passivi per il controllo dello stallo e la riduzione della resistenza al moto dell'uccello. Per testare le nostre ipotesi di lavoro, abbiamo costruito un modello al computer che accoppia il movimento delle strutture (gli azionatori) con quello del fluido sovrastante.

### Il modello strutturale

L'insieme di elementi di controllo è modellato introducendo una serie di setole rigide – cilindri di piccolo diametro – imperniate sulla parete del corpo. Ogni setola non mima individualmente il comportamento di una piuma presente sulle ali di un uccello, ma l'insieme di setole (dette "di riferimento") rappresenta l'ossatura di un rivestimento di parete che oscilla in reazione alle forze impresse dal fluido. Tale rivestimento è poroso (in quanto il fluido può entrare ed uscire dallo stesso, proprio come l'aria può infiltrarsi attraverso lo strato di piume delle ali ed uscirne) ed il suo movimento è accoppiato all'azione del vento, agendo e reagendo con lo stesso. Infine, il rivestimento è anisotropo, e quindi induce una direzione privilegiata ai filetti fluidi che lo attraversano.

La dinamica di questo strato di setole di riferimento viene descritta in termini della densità di piume presenti realmente (per una densità media imposta, avremo localmente una densità inferiore quando due setole adiacenti si allontanano tra loro, ed una densità superiore quando si avvicinano, con una forza esercitata dal fluido diversa nei due casi), di una legge elastica non-lineare che accoppia le setole di riferimento tra loro, di un parametro di dissipazione strutturale e di un parametro di rigidità, che limita l'oscillazione delle setole attorno ad una posizione di equilibrio prestabilita. L'equazione del momento angolare viene imposta per ogni setola di riferimento e il risultato fornisce il movimento di ogni struttura sotto l'azione di un carico aerodinamico, che viene stimato [4] a par-





tire da modelli di moto di puro scorrimento (in cui cioè il numero di Reynolds locale, basato sul diametro di una setola, è molto piccolo).

### **“The proof of concept”**

Il primo test su questo tipo di copertura è stato effettuato per una configurazione particolarmente semplice e ben documentata: il moto a bassa velocità di una massa d'aria attorno ad un cilindro, considerato come molto lungo nella direzione ortogonale al piano del moto. Lo scopo era quello di documentare chiaramente il meccanismo fisico dell'interazione tra il fluido e le strutture. Tale configurazione di studio è rappresentata in figura 8, dove abbiamo tracciato il campo di vorticità, mettendo in evidenza la formazione ed il rilascio periodico di vortici di grossa taglia che vengono trasportati dalla corrente allontanandosi dal cilindro stesso. La configurazione studiata corrisponde ad un numero di Reynolds pari a 200, per il quale siamo ancora in regime di moto laminare, e le setole rigide, di lunghezza pari ad un quarto del raggio del cilindro, sono disposte soltanto nella parte posteriore del corpo. Le setole si accoppiano in modo aeroelastico alle strutture coerenti rilasciate dietro al cilindro, e contribuiscono ad aumentare in modo si-

gnificativo la pressione nella regione immediatamente a valle del corpo – rispetto al caso senza azionatori – riducendo nel contempo di circa il 15% quella parte della resistenza che è legata alla pressione. Tale risultato va ascritto alla capacità di autoadattamento del sistema di controllo; la copertura di setole tende a frenare la formazione di vortici emessi dallo strato limite del cilindro e le setole, nel loro movimento oscillante, profilano il corpo dinamicamente.

Malgrado la sua semplicità, questa prima applicazione ha dimostrato che un controllo è possibile se i meccanismi fisici di accoppiamento fluido-solido sono compresi. In particolare, il controllo più efficace si trova quando la scala temporale caratteristica delle oscillazioni naturali delle strutture e la scala di rilascio dei vortici dietro al corpo sono esattamente multipli l'una dell'altra. Calcoli dettagliati dei vari esperimenti numerici di ottimizzazione nel caso accademico in oggetto sono riportati in [4]; il terreno è ora pronto per affrontare casi più realistici e di interesse pratico.

### **Il profilo alare**

Al momento, la configurazione che stiamo analizzando è quella di un'ala simmetrica (si tratta di un profilo del tipo NACA 0012)

*Fig. 7. Airone intento a pescare. Per gentile concessione di JR Compton, [www.jrcompton.com/birds](http://www.jrcompton.com/birds).*

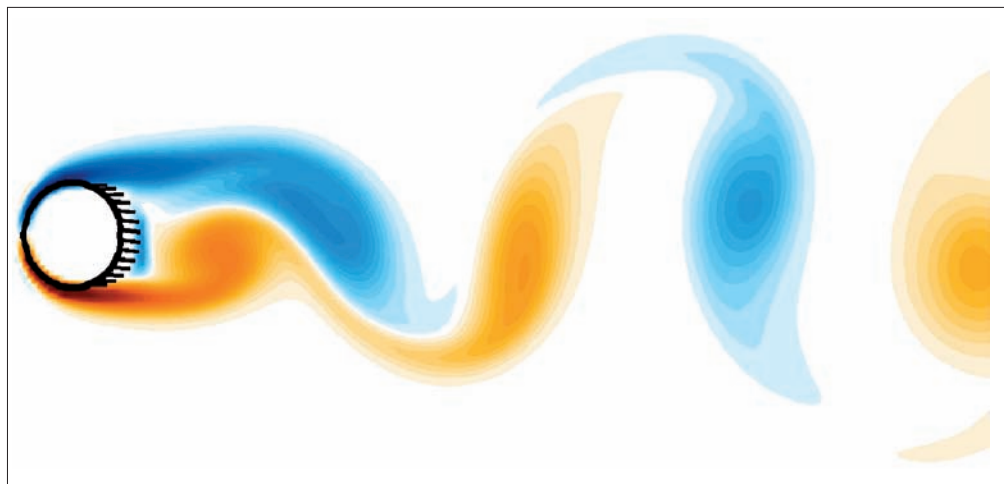
## biomimetica

posta in una corrente ad angolo di attacco di  $18^\circ$ . Questo significa che la corda del profilo forma un angolo di  $18^\circ$  rispetto al moto uniforme del fluido incidente; questo è un valore abbastanza grande perché incominci a verificarsi una caduta brusca del coefficiente di portanza, associata al fenomeno noto come stallo. Il profilo scelto non è ancora quello di una vera ala di uccello, ma comincia ad avvicinarsi. Si suppone che il fluido si muova nella galleria del vento virtuale alla velocità di  $1 \text{ ms}^{-1}$ , e che l'ala abbia una corda di 15 cm. Tali numeri, che cominciano ad avvicinarsi a valori fisicamente rappresentativi, segnalano inoltre che le condizioni di moto laminare non sono più soddisfatte. È noto che un moto turbolento è – nella stragrande maggioranza dei casi – tridimensionale, ma è stato scelto ugualmente di studiare solo la dinamica del sistema nel piano del profilo alare in quanto le principali strutture coerenti che interagiscono con gli azionatori sono proprio quelle che si trovano nel piano, che si staccano dal corpo e vengono trasportate via dalla scia

che si forma dietro al corpo stesso. Inoltre le forze aerodinamiche – resistenza e portanza – agiscono solo sul piano, mentre risultano inevitabilmente nulle le spinte lungo l'asse ortogonale al profilo. Il valore del numero di Reynolds per questo caso è di circa 10.000; siccome strutture fluide di taglia medio-piccola si formano ad intervalli di tempo ridotti, è cruciale catturarle con precisione, adottando schemi numerici ad alta precisione sia nello spazio che nel tempo. Allo stesso modo, le nostre proto-piume devono essere estremamente reattive alle forze fluidodinamiche che sono loro imposte, e in questo caso valori efficaci dei parametri della copertura strutturale differiscono rispetto al caso precedente di diversi ordini di grandezza. L'unica cosa che abbiamo mantenuto costante è la densità del materiale che costituisce gli elementi di controllo, fissata ad un valore di circa  $900 \text{ kg m}^{-3}$ , vicino a quello della cheratina, costituente primario delle piume degli uccelli.

I primi calcoli effettuati hanno mostrato che lo strato di piume può contribuire a

*Fig. 8. Istantanea del campo di vorticità per il moto dietro un cilindro provvisto di setole, disposte nella parte posteriore del corpo. I colori rosso e blu indicano il senso di rotazione opposto delle particelle fluide, e la figura mette in evidenza la formazione di grandi vortici coerenti che, dopo essersi staccati dal profilo, vengono trasportati a valle. Nell'immagine sono visualizzate solo le setole di riferimento, che costituiscono l'ossatura del sistema di controllo.*



*Fig. 9. Istantanea del campo di vorticità prodotto da un profilo alare per un numero di Reynolds pari a 10.000. Si osservi la formazione di vortici che si staccano dallo strato limite superiore dell'ala.*





ridurre la resistenza al moto e ad aumentare la portanza di qualche punto percentuale, risultando quindi un elemento determinante durante le fasi di decollo ed atterraggio degli uccelli. Un esempio del campo di moto in un dato istante di tempo è raffigurato in figura 9. Al momento stiamo cercando di ottimizzare i molti parametri in gioco per individuare la copertura piumata auto-adattante con caratteristiche capaci di attenuare meglio il fenomeno dello stallo, per mantenere in aria un'ala che – in condizioni normali – correbbe il rischio di precipitare.

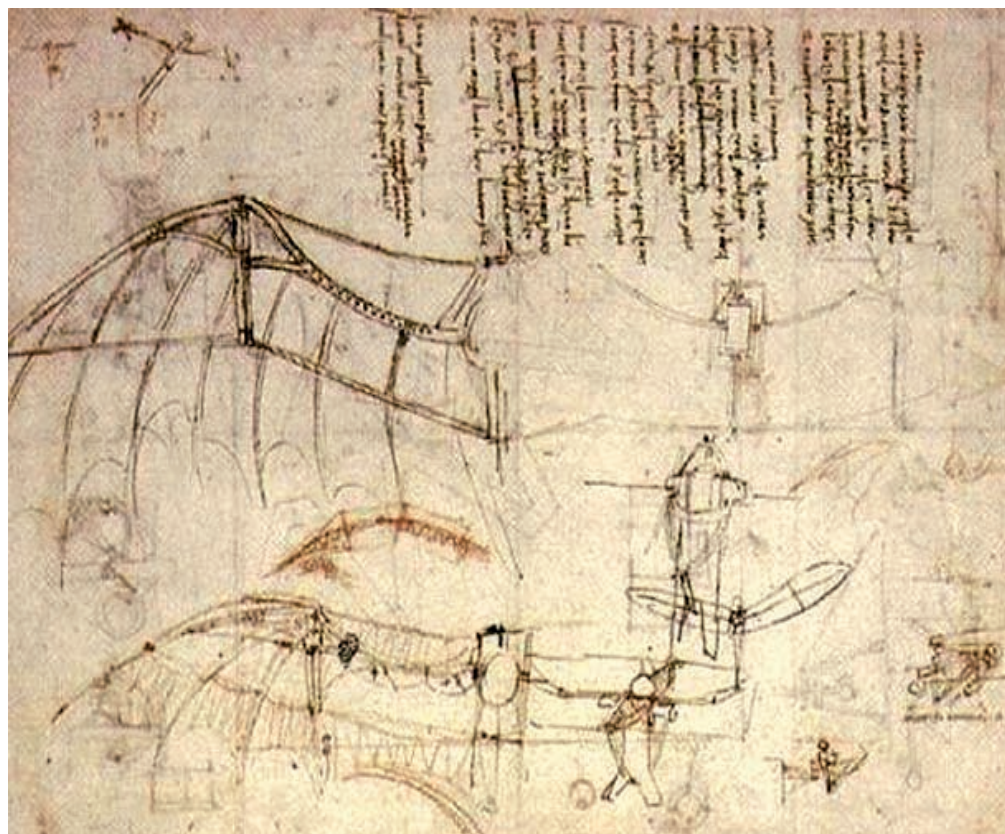
È chiaro che siamo solo agli inizi, e che tante domande non hanno ancora risposta. Per esempio, il sistema studiato – anche se produce effetti positivi per certi valori dell'angolo di incidenza – non deve produrre un effetto negativo ad angoli di attacco diversi. Questo si può risolvere, ad esempio, forzando le penne a restare parallele ed attaccate alla superficie in situazioni normali di volo, per alzarsi e vibrare soltanto quando la cosa è richiesta. Inoltre, la trasformazione in prototipo di un sistema di questo tipo si scontra con problemi pratici apparentemente banali, quali il deposito di sporcizia sul sistema che potrebbe prevenirne un uso continuativo ed efficace.

*L'ingegneria militare cerca di carpire i segreti del volo di certe civette capaci di piombare sulla preda senza fare il minimo rumore.*

### **Guardando avanti**

Le applicazioni del dispositivo studiato sono potenzialmente molto numerose. Riguardano principalmente i veicoli aerei di piccola taglia come i MAV (o droni), per i quali è interessante aumentare la portanza durante le fasi di decollo e atterraggio. Uno dei vantaggi di un dispositivo basato su setole rigide è che non richiede alcuna energia di attivazione: lo strato di proto-piume è in grado di auto-adattarsi al flusso per controllare l'emissione di vortici, che è uno dei fattori aerodinamici cruciali per la determinazione dei carichi.

Il dispositivo trova applicazioni potenziali per quasi ogni tipo di sistema in movimento in un fluido o all'interfaccia tra fluidi diversi; riuscire a controllare il moto del fluido attorno a veicoli terrestri, subacquei o in navigazione sulla superficie del mare può rivelarsi cruciale per la riduzione del coefficiente di resistenza aero/idro-dinamica; inoltre la capacità di controllare le fluttuazioni di pressione legate alle oscillazioni nel tempo di una massa d'aria può dimostrarsi utile anche per lo studio di nuove tecniche di riduzione del rumore.



Dal punto di vista bio-morfologico, simulazioni numeriche come quelle descritte in questo breve articolo possono dare indicazioni utili a chiarire certi aspetti dell'evoluzione delle piume, ad esempio per aiutare i paleontologi a dirimere la questione se certi dinosauri possano essere considerati gli antenati degli uccelli.

### Per una nuova fluidodinamica

Il volo degli uccelli è una fonte continua di idee per i fluidodinamici. È proprio osservando l'ala di un uccello che dispositivi di uso ormai comune come gli *slats* anteriori (modellati sull'alula degli uccelli, e utili per mantenere portanza durante l'atterraggio, a scapito di un aumento della resistenza) e le alette di estremità, meglio note come *winglets* (modellate sulle penne remiganti primarie incurvate verso l'alto in punta, utili per ridurre la resistenza indotta provocata dai vortici di estremità, mediante la loro attenuazione), sono stati ideati; non tutto è ancora stato imitato però e c'è ancora spazio per tanta bio-innovazione.

In ambito militare, per esempio, si sta lavorando per carpire i segreti delle piume delle ali e della coda di certe civette, capaci di piombare sulla preda senza fare il minimo

rumore, per trasferire queste conoscenze alla realizzazione di aerei da caccia furtivi, capaci di sfuggire ai radar. Un'altra attività su cui l'aviazione militare americana lavora da qualche anno, è quella delle ali a geometria variabile, per esempio per replicare il modo in cui gli uccelli piegano le ali all'indietro quando si gettano in picchiata. Recenti test in volo su aerei F-18 alla base NASA di Dryden hanno dimostrato che le ali possono subire torsioni fino a 15° e i dati raccolti costituiscono la base a partire dalla quale Boeing progetta un nuovo aereo a geometria variabile dotato di ala aeroelastica. Altri sforzi per aumentare la manovrabilità di un mezzo aereo, da parte di Boeing, di Airbus e di parecchi centri universitari, sono diretti verso l'impiego *selettivo* delle winglets, usando leghe o polimeri a memoria di forma oppure tramite tecniche meccaniche più convenzionali. Un'altra attività riguarda lo studio di nuovi materiali piezoceramici, utili per produrre lievi corrugamenti sull'ala di un aereo allo scopo di modificare le strutture fluide turbolente vicine alla superficie e la loro dinamica di auto-riproduzione. L'obiettivo ultimo è quello di ridurre quella parte della resistenza, detta di attrito, dovuta alla viscosità del fluido.

*I primi modelli di veicoli aerei ad ali battenti si devono a Leonardo Da Vinci che si ispirò al volo del pipistrello, scelto per la sua straordinaria agilità. Nella foto un disegno tratto dal Codice del volo degli uccelli (1505-1506).*

Tante cose in natura devono ancora essere osservate e capite a fondo. In questa sede ci siamo focalizzati sul volo degli uccelli, ma è chiaro che altre idee di tecnologie bio-mimetiche possono provenire dallo studio di insetti [5], pesci [6] e altri animali. Abbiamo descritto solo una parte dell'attività del progetto FLUBIO, probabilmente la parte più curiosa e mediatica; è sicuramente stimolante per l'immaginario la visione di velivoli aerei con ali ricoperte da piume che battono al vento [7].

Tantissimi altri studi di fluidodinamica biologica e ambientale sono in corso, a Genova come altrove (si consulti, a titolo di esempio, il sito del *Biomimicry Institute* che ha collezionato qualche migliaio di applicazioni possibili di tecnologie bioniche, [www.asknature.org](http://www.asknature.org)) e speriamo di poter riportare in questa sede altre attività del Dipartimento nel prossimo futuro. ●

#### Ringraziamenti

Il lavoro descritto è stato reso possibile da finanziamenti dell'Unione Europea, e in particolare da una Marie Curie Intra-European Fellowship (PIEF-GA-2008-220201) e da un finanziamento Marie Curie Early Stage Training (MEST-CT-2005-020228). Gli altri *Early Stage Trainees* del progetto FLUBIO, attivi su temi di ricerca non riportati in questa sede, che hanno trascorso soggiorni di durata compresa da tre mesi a tre anni al DICAT sono Damien Biau, Jan Cherlet, Antoine Dauplain, Anaïs Gaus, Ana Mendonça, Tomas van Oyen, Christopher Pringle e Andreas Rummel. La pagina web del progetto è [www.dicat.unige.it/flubio](http://www.dicat.unige.it/flubio). I calcoli effettuati al centro di supercalcolo dell'Università di Stoccarda sono stati resi possibili dal progetto HPC-Europa++ (numero di progetto: 211437), sostenuto dall'Unione Europea tramite il Settimo Programma Quadro sulle *Infrastrutture di Ricerca*.

#### NOTE

- (1) Il numero di Reynolds è il rapporto tra una scala di tempo caratteristica dei fenomeni viscosi rispetto a quella di fenomeni convettivi. Quando è relativamente basso – cioè quando la velocità dell'oggetto in moto in un dato fluido o la dimensione tipica dell'oggetto sono piccole – il moto è laminare.
- (2) Tante altre fotografie che illustrano un comportamento simile delle copritrici dello Skua (*Stercorarius antarcticus*) sono state fatte dal Prof. Ingo Rechenberg dell'Università Tecnica di Berlino durante soggiorni prolungati in Antartide ([www.bionik.tu-berlin.de/institut/xs2vogel.html](http://www.bionik.tu-berlin.de/institut/xs2vogel.html)).

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] **DAUPTAIN A., FAVIER J. & BOTTARO A.**, «Hydrodynamics of ciliary propulsion», *Journal of Fluids and Structures*, vol. 24, 2008, pp. 1156-1165.
- [2] **GUERRERO J.**, «Numerical simulation of the unsteady aerodynamics of flapping flight», Tesi di Dottorato in Fluidodinamica e Processi dell'Ingegneria Ambientale, DICAT, Università di Genova, aprile 2009.
- [3] **TUCKER V.A.**, «Oxygen consumption of a flying bird», *Science*, vol. 154, n. 3745, 1966, pp. 150-151.
- [4] **FAVIER J., DAUPTAIN A., BASSO D. & BOTTARO A.**, «Passive separation control using a self-adaptive hairy coating», *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 627, 2009, pp. 451-483.
- [5] **BONSIGNORI G., SCARFOGLIERO U., STEFANINI C. & DARIO P.**, «Un robot che salta come un grillo», *Sapere*, 2, 2009, pp. 62-70.
- [6] **GUGLIELMINI L.**, «Modelling of thrust-generating foils», Tesi di Dottorato in Fluidodinamica e Processi dell'Ingegneria Ambientale, DIAM, Università di Genova, aprile 2004.
- [7] «Feathers' can up plane efficiency», *The Times of India*, 16 aprile 2009, p. 13.

Alessandro Bottaro

è professore ordinario di Fluidodinamica presso il DICAT, Università di Genova e coordina il progetto FLUBIO.

Julien Favier e Joel Guerrero

sono attualmente assegnisti di ricerca e sono stati borsisti nell'ambito di FLUBIO.

Divya Venkataraman

è dottoranda in Fluidodinamica e Processi dell'Ingegneria Ambientale al DICAT.

Håkan Wedin

è titolare di una borsa Marie Curie IEF della Comunità Europea.